doi:10.13866/j.azr.2019.05.25

# 基于 FLUS 模型的天山山区未来土地利用变化预估①

秦琦瑞[1,2]， 李雪梅[1,2]， 陈庆伟[3]， 田亚林[1,2]

（1. 兰州交通大学测绘与地理信息学院，甘肃 兰州 730070；2. 甘肃省地理国情监测工程实验室，甘肃 兰州 730070；
3. 济南市交通局运输管理办公室，山东 济南 250014）

**摘 要：**基于天山山区 53 个气象站点，31 个 CMIP5 全球气候模式，集合逐年平均气候资料、社会经济和自然地形等资料，利用 FLUS 模型，预估了 2050 年 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 排放情景下天山山区土地利用变化。结果表明：① FLUS 模型能够较好地模拟研究区历史土地利用变化，具有较高的模拟精度。② 与基准期（1970—1999 年）相比，3 种情景下多年平均气温升高了 1.67 ~ 2.16 ℃，其中春季和夏季增温幅度较小，秋季和冬季增温幅度较大。多年平均降水量增加 22 ~ 25 mm，3 种情景下个别年份较基准期出现降水减少现象，但总体呈增加趋势。③ 2050 年 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 的预估结果与 2017 年实测土地利用结果相比，天山山区冰雪面积分别减少 29.2%、34.6%、38.4%。前两种情景城市用地面积增幅不大，部分耕地转换为城市用地和草地，林地面积少量增加。而 RCP8.5 情景下城市用地面积为 2017 年的近 3 倍，部分林地转换为草地。3 种情景下水体总面积略有增加，未利用地呈减少趋势。

**关键词：**气候变化；情景模拟；土地利用变化；FLUS 模型；天山山区

在全球变暖的背景下，气候变化对全球的土地利用类型、生态环境和社会经济产生了一系列影响[1]。气候变化（全球变暖、极端天气等）和生态退化（水文变化、土壤侵蚀等）对自然景观的动态变化具有长期的影响[2]。而土地是人类赖以生存的基础，土地利用/覆盖变化（land-use and land-cover change，LUCC）对自然环境和人类生存发展有着深远的影响。研究 LUCC 机理、预测土地利用演变趋势，有利于合理开发利用土地资源和实现土地利用的可持续发展[3]。

利用全球气候模式（global climate model，GCM）对未来气候的情景预估成为世界研究的热点。2013 年，联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change，IPCC）发布了第 5 次评估报告[4]，该报告中未来气候变化的预估主要基于全球耦合模型比较计划第五阶段（Coupled Model Intercomparison Project Phase 5，CMIP5）的 46 个地球系统模型结果，介绍了情景和模型的不确定性并模拟了 21 世纪及以后气候变化的预测结果[5]。CMIP5 模式数据采用了新的温室气体排放情景，称为“典型浓度目标”（representative concentration pathways，RCPs）情景[6]。为了消除单一模式的偏差，采用多模式集合方法得到的结果和观测结果最相似，更接近于真实的自然状态[7]。

影响 LUCC 的因素众多，致使土地利用类型转换过程极其复杂，构建土地利用模型有助于对复杂的系统进行简化，使人们能够更加清晰地理解土地利用变化的过程，并对未来的变化做出预估[8-9]。由 Liu 等[10]提出的 FLUS（future land use simulation）模型，能够较好地处理各驱动力因子之间的关系，模拟各土地利用类型之间的相互作用，具有较高的模拟精度，对比了 FLUS 模型与其他土地利用模拟模型的优劣，并模拟了 IPCC AR4 四种气候变化情景下中国土地利用动态变化，分析了影响土地利用类型转变的因子；周浩等[11]通过遥感影像分析得出，1990—2014 年三江平原典型流域旱地面积变化幅度较小，水田面积持续增加，并运用 FLUS 模型预估了 RCPs 情景下耕地动态变化特征；张子明等[12]利用 FLUS 模型对抚州市临川区的城镇用地增长边界划定进行了研究，并对 2025 年研究区城镇用地变化

① 收稿日期：2018-11-13； 修订日期：2019-03-21
基金项目：国家自然科学基金项目（41761014）；兰州交通大学“百名青年优秀人才培养计划”；兰州交通大学（201806）优秀平台支持项目资助
作者简介：秦琦瑞（1993-），男，硕士研究生，研究方向为气候变化和土地利用. E-mail：qinqirui1@163.com
通讯作者：李雪梅. E-mail：shuimingren@163.com

进行了情景模拟。

近 50 a 来(1961—2010 年)西北干旱半干旱地区平均增温幅度达 1.65 ℃[13],新疆天山山区被誉为“中亚水塔”和“固体水库”,由于其独特的山、盆、谷地相间的地形地貌特征,该区域对全球气候变化响应尤为敏感[14]。鉴于此,本文选取天山山区作为研究区,基于 FLUS 模型,结合 CMIP5 不同 RCP 排放情景下的 31 个全球气候模式,集合年平均气候资料、社会经济和自然地形等资料,预估了天山山区 2050 年的土地利用变化。本研究可为天山山区未来生态环境管理、土地资源合理配置以及洪涝灾害防治提供科学的决策依据。

## 1 资料和方法

### 1.1 研究区概况

我国境内的天山山区横贯新疆中部,占新疆总面积的 1/3,其北面为准噶尔盆地,南面为塔里木盆地。天山将新疆分为北疆和南疆,是南北疆气候的分水岭[15]。东西绵延 1 700 km,南北宽 250 ~ 350 km,总面积约为 $5.7 \times 10^5$ $km^2$,山地的平均海拔高度为 4 000 m。

天山山区深居我国西北内陆,属于干旱区,具有典型的大陆性气候特征。由于降水受天山独特的地形地貌和西风环流的影响,东部地区少于西部,南坡少于北坡,平原少于山区,背风坡少于迎风坡;降水随着海拔的升高先增多后减少,最大降水带一般在中高山地区,盆地为少雨区。而天山山区的年均气温西部地区低于东部,同海拔北坡低于南坡。受海拔影响天山具有明显的气候垂直地带性,形成了不同植被和土壤的自然景观[16]。

虽然天山位于炎热干燥的干旱区,高大的山地却终年寒凉湿润,积雪、冰川与冻土分布广泛,冰雪的消融在一定程度上改变了天山南北某些地理要素的状况,极大地影响了该地区人民的生产和生活[17]。

### 1.2 数据资料

本文所用数据包括天山山区 53 个气象站点(图 1)1970—1999 年的年平均气温和年累积降水资料;31 个 CMIP5 全球气候模式集合的 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 排放情景下 2021—2050 年的年平均气温和年累积降水资料(http://www.iiasa.ac.at/web-apps/tnt/RcpDb/dsd? Action = htmlpage&page = welcome),CMIP5 全球气候模式的详细介绍参见 https://pcmdi.llnl.gov/。另外,所用数据还包括 2001—2017 年空间分辨率为 500 m 的土地覆盖类型 MCD12Q1 产品数据,该数据来源于美国航空航天局(NASA, https://urs.earthdata.nasa.gov/);全国基础地理信息数据来源于全国地理信息资源目录服务系统(http://www.webmap.cn/);1 km 分辨率人口和 GDP 数据,社会经济数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/)。

### 1.3 温室气体排放情景

RCP2.6是温室气体排放和辐射强迫最低的情

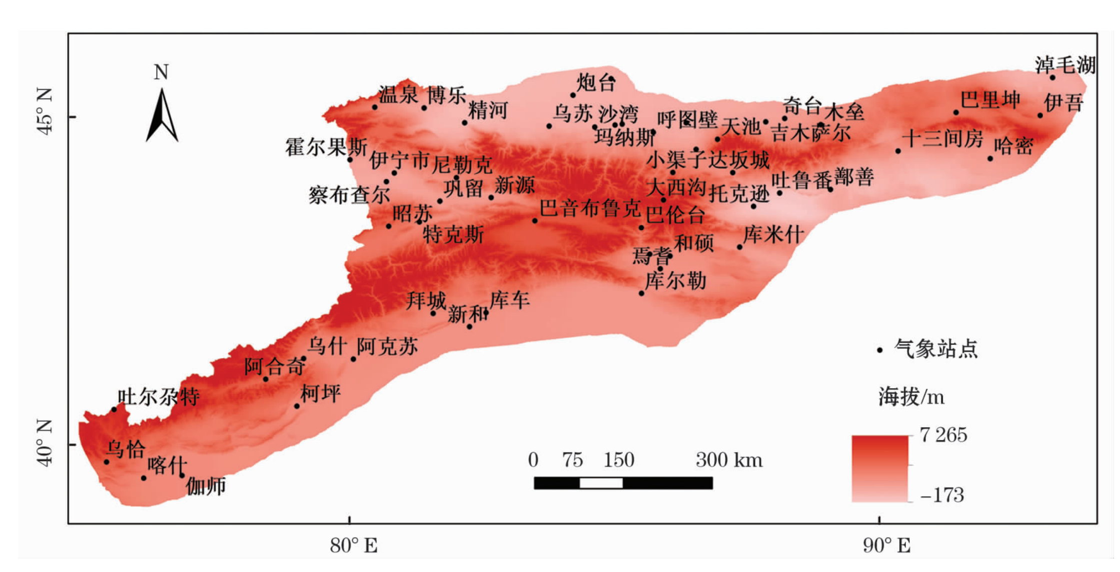



图 1 研究区气象站点空间分布

Fig. 1 Distribution of the meteorological stations in the study area

景，辐射强迫先增加后减少，至2100年减少为2.6 W·$m^{-2}$，全球平均温度上升限制在2 ℃以内。2010—2100年累计温室气体排放比基准期减少70%，GDP、人口增长率和技术创新为最低水平，促进生物质能利用，提倡恢复森林。

RCP4.5为中等排放情景，至2100年辐射强迫为4.5 W·$m^{-2}$。该情景考虑了与全球经济发展相适应的温室气体等其他物质的排放，用最低代价达到辐射强迫目标。技术发展较快，通过多用电能、低排放能源技术限制温室气体的排放，经济、社会和环境可持续发展[6]。

RCP8.5是最高的温室气体排放情景，至2100年辐射强迫升至8.5 W·$m^{-2}$。该情景人口最多、技术创新不高、能源改善缓慢，缺少应对气候变化的政策，大规模的人类活动加速温室气体排放，增加了气温和降水的异质性。

由于大多数模型未能在RCP6.0情景进行预估试验，本文没有对该情景中的仿真结果进行预测，此处对该情景不做赘述。

### 1.4 RCPs情景GDP和人口增长率

根据新疆统计年鉴、国家统计局的有关课题组对"十三五"时期的经济增长率测算和模拟，以及国务院新闻办公室2000年发表的《中国21世纪人口与发展》白皮书和中国第六次人口普查数据，在新疆2007—2017年的平均GDP和人口增长率的基础上进行微调整，设定RCPs情景下2017—2050年的GDP和人口增长率（表1）。

**表1 RCPs情景GDP和人口增长率**

**Tab.1 Growth rates of GDP and population under RCPs scenario**

| 驱动因子 | RCPs情景 | 增长率 |
|---|---|---|
| GDP | RCP2.6 | 从14%线性下降到4% |
| | RCP4.5 | 从14%线性下降到7% |
| | RCP8.5 | 保持14%增长 |
| 人口 | RCP2.6 | 从6‰线性回落到4‰ |
| | RCP4.5 | 保持5‰增长 |
| | RCP8.5 | 保持6‰增长 |

### 1.5 全球气候模式降尺度

CMIP5全球气候模式模拟精度依旧较低，忽略了小尺度上由于地表形态、生物变化和地表物理过程等因素产生的差异[18]。一般通过降尺度的方法来降低误差，获取更高精度的气候资料。本文通过双线性插值法将31个气候模式1°×1°的年平均数据插值到站点，以1970—1999年为基准期，通过偏差修正中的变化因子法（Delta）对未来2021—2050年各情景逐年数据进行了降尺度。

Delta方法是一种比较简单但在GCMs数据降尺度时常用的方法。降水选择的是相对变化量，即比较GCMs输出格网未来各情景模拟某年累积降水量与未来各情景模拟多年平均累积降水量，计算各网格降水量的变化率，各个气象站基准期实测多年平均累积降水量乘以降水量的变化率，得到未来各情景年累积降水量数据。气温选择的是绝对变化量，计算GCMs输出格网未来不同情景某年平均气温与未来多年平均气温的变化量，将该变化量加到网格内各个气象站基准期实测多年平均气温上，得到未来各情景年平均气温数据[19-20]。

Delta方法处理降水数据计算公式为：

$$P_f = P_o \frac{P_{Gf}}{P_G} \tag{1}$$

Delta方法处理气温数据计算公式为：

$$T_f = T_o + (T_{Gf} - T_G) \tag{2}$$

式中：$P_o$为实测多年平均累积降水量；$P_G$为模拟未来多年平均累积降水量；$P_{Gf}$为模拟未来某年累积降水量；$P_f$为Delta方法得到的未来年累积降水量；$T_o$为实测多年平均气温；$T_G$为模拟未来多年平均气温；$T_{Gf}$为模拟未来某年平均气温；$T_f$为Delta方法得到的未来年平均气温。

### 1.6 数据处理

FLUS模型中的数据资料必须转换成相同的分辨率和投影。本文将所有数据分辨率重采样为1 km，投影坐标系为WGS_1984_UTM_zone_43N。

在ArcGIS中，将31个气候模式年均气温和年累积降水的降尺度数据，采用反距离权重法插值为1 km栅格图像；将30 m的DEM数据，重采样为1 km空间分辨率，再提取坡度和坡向；利用欧氏距离分析全国基础地理信息数据中的镇点、道路、铁路、河流数据，得到1 km距离图（图2）；采用栅格计算得到RCPs情景下GDP和人口图。

MODIS土地利用数据MCD12Q1采用IGBP（International Geosphere-Biosphere Programme）的全球植被分类方案，本文在ArcGIS中通过重分类分为水、林地、草地、耕地、城市、冰雪和未利用土地7类（表2），重采样为1 km空间分辨率。

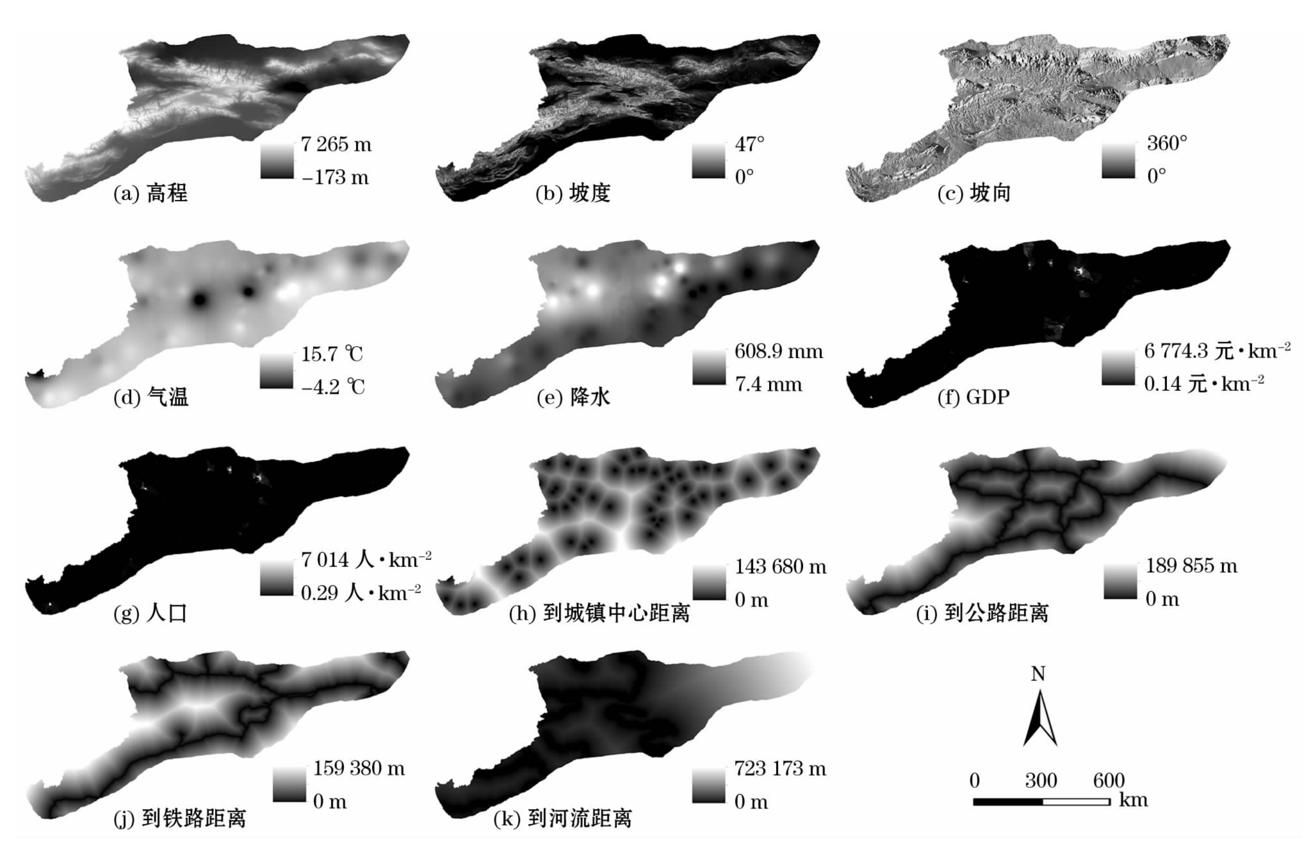



图 2 土地利用变化驱动力因子

Fig. 2 Driving factors of land use change



**表 2 土地利用类型分类**

**Tab. 2 Classification of land use types**

| 本文分类 | IGBP 全球植被分类 | 本文分类 | IGBP 全球植被分类 |
|---|---|---|---|
| 水 | 水 | 草地 | 木本热带稀树草原 |
| | 永久湿地 | | 热带稀树草原 |
| 林地 | 常绿针叶林 | | 草地 |
| | 常绿阔叶林 | 耕地 | 农用地 |
| | 落叶针叶林 | | 农用地/自然植被 |
| | 落叶阔叶林 | 城市 | 城市和建筑区 |
| | 混交林 | 冰雪 | 冰雪 |
| | 稠密灌丛 | 未利用土地 | 未利用土地 |
| | 稀疏灌丛 | | |

## 1.7 FLUS 模型

FLUS 模型由 2 个主要模块构成,分别为基于神经网络(ANN)的适宜性概率计算模块和基于自适应惯性机制的元胞自动机模块,ANN 分为 3 层,第 1 层是输入层,第 2 层是隐藏层,第 3 层是输出层。首先,将一期土地利用数据结合人类社会经济与自然效应的多种驱动力因子(气温、降水、地形、人口分布等)中采用 ANN 整合并计算研究区域内每种土地利用类型在每个像元上的出现概率,获取研究区各类土地的适宜性概率。其次,基于轮盘赌选择的自适应惯性竞争机制,在模拟过程中可以有效地处理人类活动和自然因素影响下各种土地利用类型转变的不确定性和复杂性,获取研究区土地利用模拟图[12]。其表达公式为:

$$p(k,t,l) = \sum_i w_{i,t} \times \text{sigmoid}[\text{net}_i(k,l)] = \sum_i w_{i,t} \times \frac{1}{1+e^{-\text{net}_i(k,l)}} \quad (3)$$

式中:$p(k,t,l)$ 表示第 $t$ 类土地在栅格 $k$ 上 $l$ 时刻的适宜性概率;$w_{i,t}$、sigmoid 分别为隐藏层与输出层间的权值和激励函数;$\text{net}_i(k,l)$ 表示在第 $i$ 个隐藏层栅格 $k$ 在时间 $l$ 的响应值。

$$\sum_t p(k,t,l) = 1 \quad (4)$$

式中:适宜性概率 $p(k,t,l)$ 表示在 $l$ 时刻的栅格 $k$ 上,各类的适宜性概率之和为 1。

$$\text{Inertia}_t^l = \begin{cases} \text{Inertia}_t^l, & if\ |M_t^{l-2}| \leqslant |M_t^{l-1}| \\ \text{Inertia}_t^l \times \dfrac{M_t^{l-2}}{M_t^{l-1}}, & if\ 0 > M_t^{l-2} > M_t^{l-1} \\ \text{Inertia}_t^l \times \dfrac{M_t^{l-1}}{M_t^{l-2}}, & if\ M_t^{l-1} > M_t^{l-2} > 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中:Inertia 为土地需求数量与土地数量的差异决

定自适应惯性系数；$M_t^{l-1}$、$M_t^{l-2}$ 分别表示 $t$ 种用地类型在 $l-1$、$l-2$ 两个不同时刻的栅格数与所需求数量之差；$t$ 种地类在 $l$ 时刻的自适应惯性系数表示为 $\text{Inertia}_t^l$。

$$\text{TPS}_{k,t}^l = p(k,t,l) \times \Omega_{k,t}^l \times \text{Inertia}_t^l \times (1 - sc_{c\to t}) \quad (6)$$

式中：$\text{TPS}_{k,t}^l$ 表示 $l$ 时刻的栅格 $k$ 转化为 $t$ 种用地类型的总概率；$sc_{c\to t}$ 为土地利用类型 $c$ 转化为类型 $t$ 的成本；$1-sc_{c\to t}$ 表示发生转化的难易程度；$\Omega_{k,t}^l$ 为领域作用。

$$\Omega_{k,t}^l = \frac{\sum_{N\times N} \text{con}(c_p^{l-1}=t)}{N\times N-1} w_t \quad (7)$$

式中：$\sum_{N\times N} \text{con}(c_p^{l-1}=t)$ 表示在 $N\times N$ 的摩尔邻域窗口，上一次迭代结束后第 $t$ 种地类的栅格总数，本文 $N=3$；$w_t$ 为邻域影响程度的权重。

## 2 结果与分析

### 2.1 数据检验和模型验证

2.1.1 降尺度数据检验 检验 CMIP5 多模式集合基准期的气温和降水数据在天山山区降尺度的结果见表 3。CMIP5 多模式集合对于天山山区基准期的气温模拟偏低，降水量模拟偏高，但是冬季气温和夏季降水模拟值与实测值误差较小。经过 Delta 降尺度处理后基准期的多年平均值与实测值相近，其中气温（除冬季）和降水较实测值略微偏低，气温误差为 0.15 ℃左右，降水相对误差都在 1% ~5%。

2.1.2 FLUS 模型精度检验 采用 2001 年土地利用现状图模拟 2010 年土地利用对 FLUS 模型进行率定，并用 2010 年土地利用现状图模拟 2017 年土地利用进行验证。首先，将 2001 年土地利用现状图结合 2001—2010 年驱动力因子作为输入层，输出层有 7 个神经元（对应 7 种土地利用类型），每种土地利用类型均匀取样 2% 进行神经网络训练，获取各类土地的适宜性概率图。然后，将 2001 年土地利用图和土地利用类型适宜性概率输入自适应惯性机制的元胞自动机模块，运行得到 2010 年土地利用模拟图。最后，将 2010 年土地利用现状图与模拟图进行对比分析（图 3），计算结果 Kappa 系数为 0.71，整体精度为 0.83。同上操作，采用 2010 年土地利用现状图模拟 2017 年土地利用，并与 2017 年土地利用现状图对比，计算结果 Kappa 系数为 0.74，整体精度为 0.84。由此表明，FLUS 模型能较好地模拟出土地利用类型分布，该模型可用于土地利用变化

**表 3 气温和降水降尺度前后对比结果**

**Tab. 3 Compared results of temperature and precipitation before and after downscaling**

| 年 份 | 观测/CMIP5 模式预估 | 多年平均气温/℃ | | | | | 多年平均降水量/(mm·a$^{-1}$) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 年 | 春 | 夏 | 秋 | 冬 | 年 | 春 | 夏 | 秋 | 冬 |
| 1970—1999 | 观测 | 7.22 | 9.41 | 21.50 | 7.49 | -9.52 | 184.56 | 198.48 | 326.52 | 147.48 | 65.76 |
| | 降尺度前 | 4.63 | 5.46 | 19.36 | 4.24 | -10.52 | 261.12 | 347.88 | 344.28 | 193.56 | 158.76 |
| | 降尺度后 | 7.09 | 9.23 | 21.11 | 7.36 | -9.34 | 181.20 | 194.88 | 320.76 | 144.84 | 68.76 |

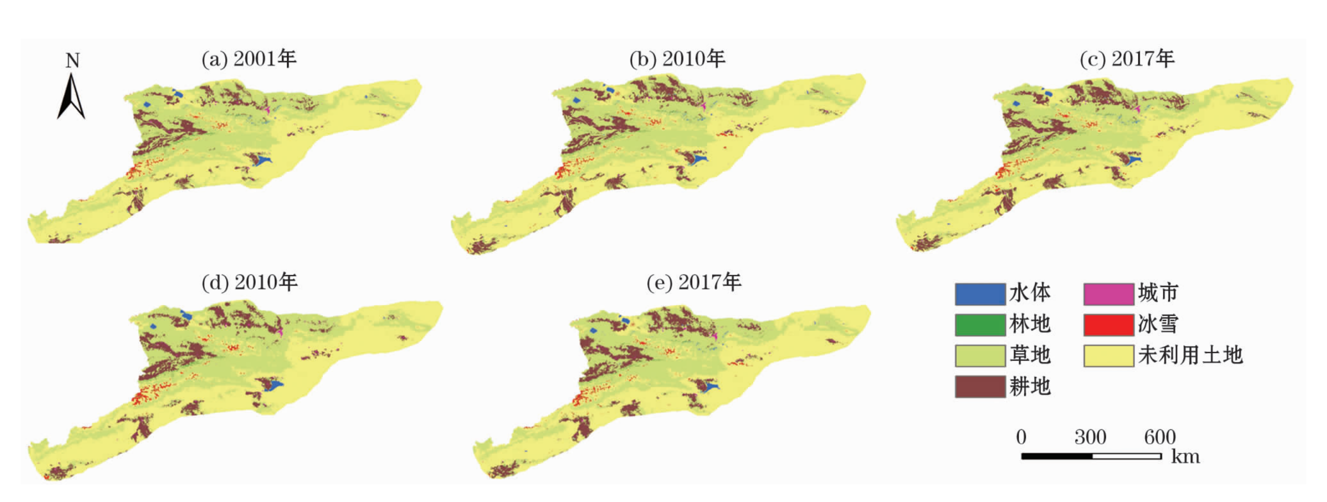



图 3 土地利用现状与 FLUS 模拟对比

Fig. 3 Comparison between present situation of land use and FLUS simulation

的预估。

**2.2 气温和降水的变化预估**

CMIP5 多模式集合在 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 情景下,天山山区的年平均气温和年累积降水量经过 Delta 方法处理后,以 1970—1999 年作为基准期,预估 2021—2050 年相对于基准期的变化。

2.2.1 年平均气温变化分析 3 种情景下,天山山区 2021—2050 年 CMIP5 多模式集合多年平均气温较基准期均有升高,RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 情景分别增加了 1.67 ℃、1.77 ℃和 2.16 ℃(图 4)。从季节来看,春季和夏季升温幅度较小,秋季和冬季升温幅度较大。

RCP2.6 情景下 2030 年、2040 年、2050 年平均气温较基准期分别增加 1.28 ℃、1.26 ℃、0.81 ℃;RCP4.5 情景下分别增加 1.11 ℃、1.29 ℃、1.39 ℃;RCP8.5 情景下分别增加 1.39 ℃、1.52 ℃、1.97 ℃。

2.2.2 年累积降水变化分析 3 种情景下,天山山区 2021—2050年 CMIP5多模式多年平均降水量较基准期均有增加。由于天山山区地处干旱区,整体增幅不大,为 22 ~ 25 mm。其中 RCP2.6 情景增幅最大,RCP4.5 情景增幅最小。从季节上来看,夏季降水增幅较大,冬季降水量增幅较少。3 种情景下个别年份较基准期出现降水减少的现象,但总体呈增加趋势(图 5)。

RCP2.6 情景下 2030 年、2040 年、2050 年累积降水量较基准期分别增加 40.9 mm、26.7 mm、90.7 mm;RCP4.5 情景下分别增加 37.2 mm、23.8 mm、74.6 mm;RCP8.5 情景下分别增加 30.1 mm、26.6 mm、88 mm。

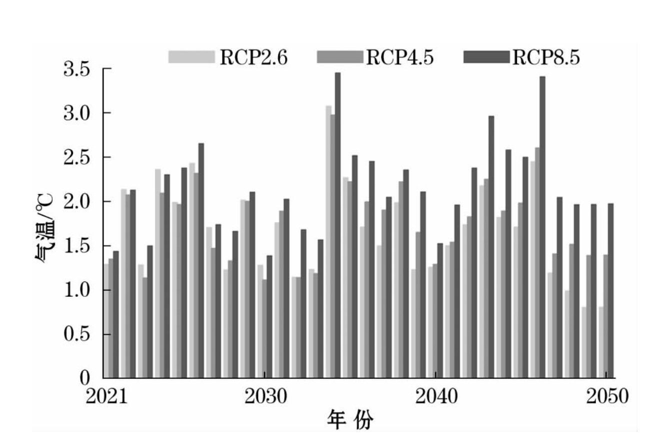



图 4 RCPs 较基准期年平均气温变化

Fig. 4 Amplitude of mean annual temperature during 2021 – 2050 under RCPs scenario compared with that during base period (1971 – 1999)

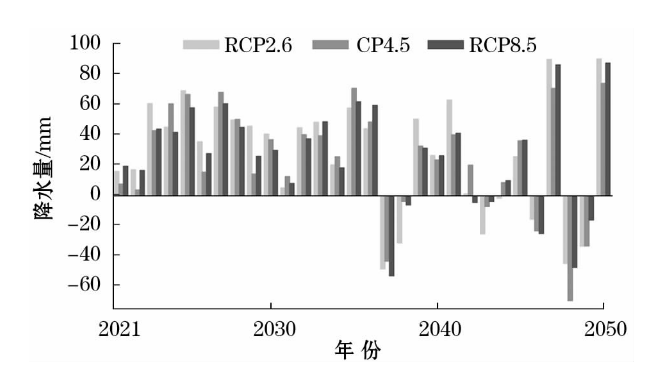



图 5 RCPs 较基准期年累积降水量变化

Fig. 5 Amplitude of cumulated annual precipitation during 2021 – 2050 under RCPs scenario compared with that during base period (1971 – 1999)

**2.3 未来土地利用变化分析**

将 2017 年土地利用现状图和 3 种情景下的驱动力因子作为 FLUS 模型的输入,运行模型后输出 1 km 空间分辨率的土地利用栅格图,分析 2050 年 RCPs 情景下天山山区土地利用变化(图 6)。

2.3.1 RCP2.6 情景下未来土地利用变化 RCP 2.6情景是相对保守的发展策略,与 2017 年相比,2050 年水域、林地、草地和城市面积分别增加了 8.6%、3%、10.1% 和24.7%,而耕地、冰雪和未利

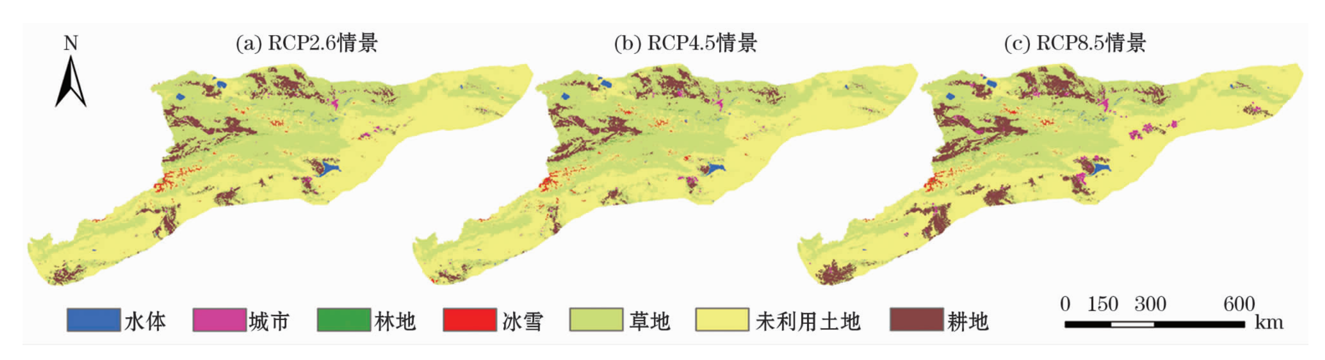



图 6 RCPs 情景下 2050 年土地利用变化

Fig. 6 Land use change in 2050 under RCPs scenario

用土地面积分别减少了24.3%、29.2%和3.1%（表4）。在不同土地利用类型向其他地类转入的过程中，耕地和未利用地向草地转换的面积较大，分别为13 339 km$^2$ 和 8 501 km$^2$，占草地转入总面积的57.8%和36.8%；冰雪转入草地面积为1 034 km$^2$，占冰雪总面积的24.6%。草地和未利用地土地利用变化活跃，向各类土地利用类型均有转换。城镇周围耕地大面积地向草地转换，奇台—木垒—吉木萨尔、库尔勒—焉耆和哈密等地区耕地明显减少；城市的扩张也侵占了部分耕地，如：乌鲁木齐、吐鲁番和托克逊等；其他类型的土地转换为草地的面积小且较为分散。由此可见，RCP2.6情景低人口、GDP增长率和提倡恢复森林的政策，使得天山山区粮食压力减少，导致耕地面积大幅减少，而林地略有增加。气候变暖导致雪线上升，2050年冰雪面积将减少29.2%，消融的冰雪转换为草地和未利用地。低海拔地区范围较小的冰雪将会消失，高海拔地区冰雪面积消融较少。降水的增多和冰雪消融的补给，导致艾比湖和博斯腾湖面积有所增加，水体总面积增加。

2.3.2　RCP4.5情景下未来土地利用变化　在RCP4.5情景下，2050年较2017年水域、林地、草地和城市面积分别增加了2.1%、17%、16.3%和36.8%，而耕地、冰雪和未利用土地面积分别减少了29.8%、34.6%和7.1%（表5）。在不同土地利用类型向其他地类转入的过程中，耕地和未利用地向草地转换的面积较大，分别为12 942 km$^2$ 和 24 821 km$^2$，占草地转入总面积的33.7%和64.6%；草地转换为林地的面积为339 km$^2$，占林地转入总面积的86.3%；草地转换为耕地的面积为2 981 km$^2$，占耕地转入总面积的94.7%。气温的上升和降水的增加，导致草地和未利用地变化活跃，向各类土地利用类型均有转换。草地的分布区域集聚化，草地的景观破碎度有所减少，阿合奇西部和巴里坤地区的未利用地转换为草地尤为明显；阿克苏—乌什、库车和库尔勒等区域的耕地明显减少并转换为草地。城市的发展导致部分耕地转换为建设用地，主要在乌鲁木齐、石河子和库尔勒等地区。可持续发展的政策

**表4　2017年与RCP2.6情景2050年土地利用变化面积转移矩阵**

**Tab.4　Transition matrix of land use change in 2017 and 2050 under RCP2.6 scenario**　/km$^2$

| 土地利用类型 | | RCP2.6情景2050年 | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 水域 | 林地 | 草地 | 耕地 | 城市 | 冰雪 | 未利用地 | 2017年合计 |
| 2017年 | 水域 | 2 815 | 0 | 57 | 1 | 0 | 0 | 23 | 2 896 |
| | 林地 | 0 | 1 102 | 97 | 2 | 0 | 0 | 2 | 1 203 |
| | 草地 | 287 | 93 | 190 501 | 1 463 | 329 | 2 | 1 260 | 193 935 |
| | 耕地 | 16 | 14 | 13 339 | 36 116 | 318 | 0 | 25 | 49 828 |
| | 城市 | 0 | 0 | 49 | 103 | 1 841 | 0 | 14 | 2 007 |
| | 冰雪 | 0 | 24 | 1 034 | 0 | 0 | 2 846 | 298 | 4 202 |
| | 未利用地 | 27 | 6 | 8 501 | 41 | 14 | 129 | 220 497 | 229 215 |
| | 2050年合计 | 3 145 | 1 239 | 213 578 | 37 726 | 2 502 | 2 977 | 222 119 | 483 286 |

**表5　2017年与RCP4.5情景2050年土地利用变化面积转移矩阵**

**Tab.5　Transition matrix of land use change in 2017 and in 2050 under RCP4.5 scenario**　/km$^2$

| 土地利用类型 | | RCP4.5情景2050年 | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 水域 | 林地 | 草地 | 耕地 | 城市 | 冰雪 | 未利用地 | 2017年合计 |
| 2017年 | 水域 | 2 312 | 13 | 408 | 11 | 0 | 6 | 146 | 2 896 |
| | 林地 | 3 | 1 015 | 164 | 0 | 0 | 9 | 12 | 1 203 |
| | 草地 | 199 | 339 | 187 097 | 2 981 | 105 | 22 | 3 192 | 193 935 |
| | 耕地 | 4 | 0 | 12 942 | 31 813 | 603 | 0 | 4 466 | 49 828 |
| | 城市 | 0 | 0 | 24 | 27 | 1 940 | 0 | 16 | 2 007 |
| | 冰雪 | 7 | 2 | 67 | 0 | 0 | 2 478 | 1 648 | 4 202 |
| | 未利用地 | 431 | 39 | 24 821 | 129 | 98 | 233 | 203 464 | 229 215 |
| | 2050年合计 | 2 956 | 1 408 | 225 523 | 34 961 | 2 746 | 2 748 | 212 944 | 483 286 |

使林地面积增加,增加的区域比较分散。雪线逐渐上升,冰雪面积逐渐减小,更多小范围低海拔的冰雪消失,减少的冰雪面积转换为未利用土地和草地。水体面积变化同 RCP2.6 情景相似。

2.3.3 RCP8.5 情景下未来土地利用变化 RCP 8.5是温室气体排放最高的情景,高排放的发展策略导致很多土地利用类型发生了重大改变。2050 年较 2017 年水域、草地、耕地和城市面积分别增加了 5.5%、2%、7.9% 和 199.6%,而林地、冰雪和未利用土地面积分别减少了 18.5%、38.4% 和 4.5%(表6)。在不同土地利用类型向其他地类转入的过程中,耕地和未利用地向草地转换的面积较大,分别为 2 072 $km^2$ 和 7 125 $km^2$,占草地转入总面积的 22.1% 和 76%;草地和未利用地向耕地转换的面积分别为 2 955 $km^2$ 和 3 784 $km^2$,占耕地转入总面积的 42.9% 和 55%;耕地和未利用地向城市转换的面积分别为 790 $km^2$ 和 2 579 $km^2$,占耕地转入总面积的 19.3% 和 62.9%。2050 年的城市面积较 2017 年将会增加 2 倍,城市的发展将更多地占用周边的未利用地和耕地,呈现为蔓延式扩张,各城市的面积均将有所增加,增加最为明显的是乌鲁木齐、吐鲁番—托克逊和库尔勒等地区。RCP8.5 情景高人口和 GDP 增长率,导致耕地面积大幅增加,以缓和人口急剧增长带来的粮食生产压力,主要有喀什、阿克苏和哈密等地区。除高海拔地区山顶终年积雪依旧存在外,其他低海拔小范围的冰雪将会完全消失,部分冰雪消融后形成洼地或注入河湖,导致水体总面积增加。

**表 6 2017 年与 RCP8.5 情景 2050 年土地利用变化面积转移矩阵**

**Tab.6 Transition matrix of land use change in 2017 and in 2050 under RCP8.5 scenario**

/$km^2$

| 土地利用类型 | | RCP8.5 情景 2050 年 | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 水域 | 林地 | 草地 | 耕地 | 城市 | 冰雪 | 未利用地 | 2017 年合计 |
| 2017 年 | 水域 | 2 842 | 6 | 33 | 4 | 0 | 0 | 11 | 2 896 |
| | 林地 | 0 | 914 | 72 | 112 | 2 | 0 | 103 | 1 203 |
| | 草地 | 10 | 59 | 188 532 | 2 955 | 692 | 0 | 1 687 | 193 935 |
| | 耕地 | 5 | 2 | 2 072 | 46 884 | 790 | 0 | 75 | 49 828 |
| | 城市 | 0 | 0 | 44 | 0 | 1 911 | 0 | 52 | 2 007 |
| | 冰雪 | 1 | 0 | 27 | 26 | 38 | 2 451 | 1 659 | 4 202 |
| | 未利用地 | 197 | 0 | 7 125 | 3 784 | 2 579 | 137 | 215 393 | 229 215 |
| | 2050 年合计 | 3 055 | 981 | 197 905 | 53 765 | 6 012 | 2 588 | 218 980 | 483 286 |

综上所述,3 种情景发展策略和气候变化不同,导致 2050 年冰雪面积明显减少,RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 情景比 2017 年分别减少 29.2%、34.6% 和 38.4%。温度上升和城市发展导致部分地区水体面积减少,冰雪消融汇入部分河流湖泊或形成洼地致使水体面积增加,总体来说水体总面积略有增加。城市快速的扩张以适应人口的增加和经济增长,RCP2.6 和 RCP4.5 情景下城市面积增加较少,RCP8.5 情景下城市面积急剧增加,几乎是 2017 年的 3 倍。RCP2.6 和 RCP4.5 情景下耕地面积分别减少 24.3% 和 29.8%,人类的活动可能占用更多耕地,使城市用地增加,气候的原因也使部分耕地转换为草地;RCP8.5 情景下耕地的增加 7.9%,以适应城市以及人口大幅度的增加。前两种情景林地面积增加,而 RCP8.5 情景下林地面积减少。未利用土地面积均在减少,RCP4.5 情景减少最多,为 7.1%;未利用土地向其他土地利用类型转换,大部分转换为草地。

## 3 结论与讨论

本文基于 FLUS 模型,结合天山山区 53 个气象站点,31 个 CMIP5 全球气候模式集合逐年平均气候数据、社会经济和自然地形数据对 RCPs 情景下 2050 年天山山区的土地利用类型进行了预测分析:

(1) 构建的 FLUS 模型能够较好地模拟研究区历史土地利用变化,具有较高的模拟精度。

(2) 3 种情景下多年平均气温升高 1.67 ~ 2.16 ℃,其中春、夏季增幅较小,秋、冬季增幅较大。天山山区地处西北干旱区,多年平均降水量增加 22 ~ 25 mm,3 种情景下个别年份较基准期出现降水减少现象,但总体呈增加趋势。

(3) 与 2017 年实测土地利用相比,人类活动和

气候变化导致2050年RCP2.6、RCP4.5和RCP8.5情景下的预估结果相差各异。2050年天山山区冰雪用地均有减少且有转换为草地或未利用地之势,3种情景下分别减少了29.2%、34.6%、38.4%。前两种情景城市用地增幅不大,部分耕地转换为城市用地和草地,林地面积也有所增加。而RCP8.5城市用地面积为2017年的近3倍,部分林地转换为草地。3种情景水体总面积略有增加,未利用地均呈减少趋势。

本文采用的31个CMIP5气候模式集合年均数据,没有对各模式在天山山区气候模拟的优劣进行分析,各模式模拟精度在气温和降水等方面仍有差异,存在较大的不确定性。1 km空间分辨精度的土地利用图依旧会忽略地形起伏、植被变化和微气候等因素产生的差异,也会带来一定的不确定性。另外,降尺度方法的选择和FLUS模型参数的设置也使模拟和预测结果有一定的误差。选用其他降尺度的方法,在实际多类别土地利用变化模拟中,加入其他自然与人类活动因素的影响,将是未来工作的重点。

## 参考文献(References):


〔1〕 姜群鸥,邓祥征,柯新利,等. RCPs气候情景下珠江三角洲地区城市用地扩展的预测与模拟〔J〕. 应用生态学报,2014,25(12):3 627－3 636.〔Jiang Qunou,Deng Xiangzheng,Ke Xinli,et al. Prediction and simulation of urban area expansion in Pearl River Delta Region under the RCPs climate scenarios〔J〕. Chinese Journal of Applied Ecology,2014,25(12):3 627－3 636.〕

〔2〕 Li X,Chen G Z,Liu X P,et al. A new global land-use and land-cover change product at a 1 km resolution for 2010 to 2100 based on human-environment interactions〔J〕. Annals of the Association of American Geographers,2017,107(5):1 040－1 059.

〔3〕 刘甲红,徐露洁,潘骁骏,等. 土地利用/土地覆盖变化情景模拟研究进展〔J〕. 杭州师范大学学报(自然科学版),2017,16(5):551－560.〔Liu Jiahong,Xu Lujie,Pan Xiaojun,et al. Research progress on land-use and land-cover change scenario simulation〔J〕. Journal of Hangzhou Normal University(Natural Science Edition),2017,16(5):551－560.〕

〔4〕 IPCC. Climate Change 2013:The Physical Science Basis〔M〕. Cambridge:Cambridge University Press,2013:1 535.

〔5〕 董思言,高学杰. 长期气候变化:IPCC第五次评估报告解读〔J〕. 气候变化研究进展,2014,10(1):56－59.〔Dong Siyan,Gao Xuejie. Long-term climate change:Interpretation of IPCC Fifth Assessment Report〔J〕. Climate Change Research,2014,10(1):56－59.〕

〔6〕 沈永平,王国亚. IPCC第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点〔J〕. 冰川冻土,2013,30(5):1 068－1 076.〔Shen Yongping,Wang Guoya. Key findings and assessment results of IPCC WGI Eifth Assessment Report〔J〕. Journal of Glaciology and Geocryology,2013,35(5):1 068－1 076.〕

〔7〕 徐敏,于庚康,徐经纬,等. 不同分辨率下全球气候模式的集合结果检验〔J〕. 气象科学,2013,33(2):160－167.〔Xu Min,Yu Gengkang,Xu Jingwei,et al. Assessment of global climate models based on different resolution sets of simulation results〔J〕. Journal of the Meteorological Sciences,2013,33(2):160－167.〕

〔8〕 李少英,刘小平,黎夏,等. 土地利用变化模拟模型及应用研究进展〔J〕. 遥感学报,2017,21(3):329－340.〔Li Shaoying,Liu Xiaoping,Li Xia,et al. Simulation model of land use dynamics and application:Progress and prospects〔J〕. Journal of Remote Sensing,21(3):329－340.〕

〔9〕 Newman G,Hollander J,Lee J,et al. A neighborhood-scaled right sizing strategy based on land use dynamics〔J〕. Journal of Geovisualization and Spatial Studies,2018,2(2):11.

〔10〕 Liu X P,Liang X,Li X,et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects〔J〕. Landscape and Urban Planning,2017,168:94-116.

〔11〕 周浩,雷国平,杨雪昕,等. RCPs气候情景下三江平原典型流域耕地动态模拟〔J〕. 农业机械学报,2017,48(10):121－132.〔Zhou Hao,Lei Guoping,Yang Xuexin,et al. Simulation of cultivated land under RCPs scenarios in typical basin of Sanjiang Plain〔J〕. Transactions of The Chinese Society of Agricultural,2017,48(10):121－132.〕

〔12〕 张子明,刘平辉,朱寿红. 基于FLUS模型的城镇用地增长边界划定研究——以临川区为例〔J〕. 江西农业学报,2018,30(5):117－123.〔Zhang Ziming,Liu Pinghui,Zhu Shouhong. Delimitation of urban land growth boundary based on FLUS model:A case study of Linchuan district〔J〕. Acta Agriculturae Jiangxi,2018,30(5):117－123.〕

〔13〕 Li X M,Li L H. Temporal and spatial variation of 10-day mean air temperature in Northwestern China〔J〕. Theoretical and Applied Climatology,2015,119(1－2):285－298.

〔14〕 Chen Y N,Li W H,Deng H J,et al. Changes in Central Asia's water tower:Past,present and future〔J〕. Scientific Report,2016,6:35 458.

〔15〕 李雪梅,高培,李倩,等. 中国天山积雪对气候变化响应的多通径分析〔J〕. 气候变化研究进展,2016,12(4):303－312.〔Li Xuemei,Gao Pei,Li Qian,et al. Muti-paths impact from climate change on snow cover in Tianshan Mountainous area of China〔J〕. Climate Change Research,2016,12(4):303－312.〕

〔16〕 赵玲. 天山山区气候变化及其对草地植被的影响〔D〕. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2012.〔Zhao Ling. Climate Change and Its Impact on Rangeland Vegetation in Tianshan Mountains〔D〕. Urumqi:Xinjiang Agricultural University,2012.〕

〔17〕 胡汝骥. 中国天山自然地理〔M〕. 北京:中国环境科学出版社,2004:154－155.〔Hu Ruji. Physical Geography of the Tianshan

Mountains in China〔M〕. Beijing: China Environmental Science Press,2004:154 - 155.〕

〔18〕成爱芳,冯起,张建恺,等.未来气候情景下气候变化响应过程研究综述〔J〕.地理科学,2015,35(1):84 - 90.〔Cheng Aifang, Feng Qi,Zhang Jiankai,et al. A review of climate change scenario for impacts process study〔J〕. Scientia Geographica Sinica,2015, 35(1):84 - 90.〕

〔19〕黎敏,吕海深,欧阳芬.基于 Delta 方法的淮河流域气候变化预测分析〔J〕. 人民长江,2012,43(7):11 - 14.〔Li Min, Lü Haishen,Ouyang Fen. Analysis and prediction of climate change in Huaihe River Basin based on Delta method〔J〕. Yangtze River, 2012,43(7):11 - 14.〕

〔20〕李雪梅,李兰海,白磊,等.基于中亚气候数据的开都河流域历史气候资料重建〔J〕.自然资源学报,2012,27(11):1 918 - 1 930.〔Li Xuemei,Li Lanhai,Bai Lei,et al. Reconstruction of climatic data in the Kaidu River basin based on climatic data of Central Asia〔J〕. Journal of Natural Resources,2012,27(11):1 918 - 1 930.〕

# Estimation of Future Land Use Change in the Tianshan Mountainous Based on FLUS Model

QIN Qi-rui[1,2], LI Xue-mei[1,2], CHEN Qing-wei[3], TIAN Ya-lin[1,2]

(1. *Faculty of Geomatics*, *Lanzhou Jiaotong University*, *Lanzhou* 730070, *Gansu*, *China*;
2. *Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring*, *Lanzhou* 730070, *Gansu*, *China*;
3. *Transportation Management Office*, *Jinan Transportation Bureau*, *Jinan* 250014, *Shandong*, *China*)

**Abstract**: In this paper, the 31 global climate models were integrated from the Phase 5 of Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5) to study the overall prediction of land use change in the Tianshan Mountains under three emission scenarios, i. e., the Representative Concentration Pathways (RCPs) 2.6, 4.5 and 8.5. In the study, the observed climatic data from 53 meteorological stations, socioeconomic data and natural geomorphological conditions in the Tianshan Mountains were used. The results showed that: ① FLUS model could be used to simulate the historical land use change in the study area with high accuracy; ② Compared with the base period from 1970 to 1999, the average annual temperature would be increased by 1.67 - 2.16 ℃ during 2021 - 2050, and its increase would be low in spring and summer but high in autumn and winter. It was revealed that the average annual precipitation would be increased by 22 - 25 mm under RCPs 2.6, 4.5 and 8.5. Under the three scenarios, precipitation reduction would occur in some years compared to the base period, but there would be holistically an increase trend; ③ Compared with the situation of land use change in 2017, it was estimated that, under the RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, the glacier and snow areas in the Tianshan Mountainous in 2050 would be reduced by 29.2%, 34.6% and 38.4% respectively. The enlargement of urban land area in 2050 would not be significant under RCP2.6 and RCP4.5. Some of the cultivated land would be converted into urban land and grassland, and the area of woodland would be slightly enlarged. The urban land area under the RCP8.5 scenario would be nearly three times of that in 2017. Part of woodland would be converted into grassland. The total area of waters would be slightly enlarged, and the area of unused land will be in a reduction trend.

**Key words**: climate change; scenario simulation; land use change; FLUS model; Tianshan Mountainous